

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

А.Д. Головин, А.В. Демин

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и опти-
ки (Университет ИТМО),
АО «ЛОМО»

Для задач обнаружения и идентификации углеводородов и других летучих органических соединений (ЛОС) разработан эскизный проект компактного гиперспектрального прибора с высоким пространственным и спектральным разрешением. В работе приводится расчет диапазонов оптических толщин среды и оценка погрешности измерения для различных спектральных окон прозрачности атмосферы. На основе схемы Оффнера разработана предполагаемая оптическая система, произведено аналитическое конструирование и энергетический расчет.

Ключевые слова: экологический мониторинг, обнаружение ЛОС, гиперспектрометр Оффнера, БПЛА, сигнал/шум, оптическая толщина.

Введение

Добыча и транспортировка углеводородов в настоящее время является доминирующей отраслью российской экономики. Общая протяженность газо- и нефтепроводов в России составляет более 930 тыс. км. Учитывая последствия экологических проблем, потери сырья вследствие больших и мелких утечек и участвовавшие случаи незаконных врезок в газонефтяные магистрали, растет потребность в обеспечении мониторинга инфраструктурных объектов и комплексов для контроля надлежащего технического состояния каждого участка системы [1].

Анализ известных методов и средств мониторинга газо- и нефтепроводов в оптическом диапазоне с борта самолета (вертолета) показал, что все они несут в себе высокую вероятность ошибок при идентификации пробоев и применяемая в этих системах оптико-электронная аппаратура не обеспечивает решение всех задач, в частности поиск мелких утечек, детектирование и определение концентрации газов с построением тематических карт. Помимо этого используемые системы мониторинга закупаются, как правило, за рубежом и имеют высокую стоимость [2-5].

Существует необходимость в создании и разработке малогабаритных и компактных комплексов мониторинга для работы в полевых условиях и на труднодоступных территориях с широким охватом и универсальностью применения, позволяющих анализировать и идентифицировать углеводороды и другие летучие органические соединения (ЛОС) на основе их подробных спектральных характеристик.

Уникальность гиперспектральной системы заключается в её возможности фиксировать излучение в сотнях очень узких спектральных диапазонах, которые позволяют оценить физико-химические свойства исследуемых объектов. Для сбора кубической модели изображения или «гиперкуба» исследуемая сцена сканируется вдоль направления движения платформы, одновременно собирая на второй размерности детектора всю спектраль-

ную информацию. Основным преимуществом такого режима является синхронность при сборе линейно диспергированного спектра без необходимости для постобработки [6-9].

Беспилотный летательный аппарат, оборудованный гиперспектральным модулем, сможет обеспечить сбор спектрально-топологических данных высокого разрешения в интересующем районе без значительных затрат (рисунок 1).

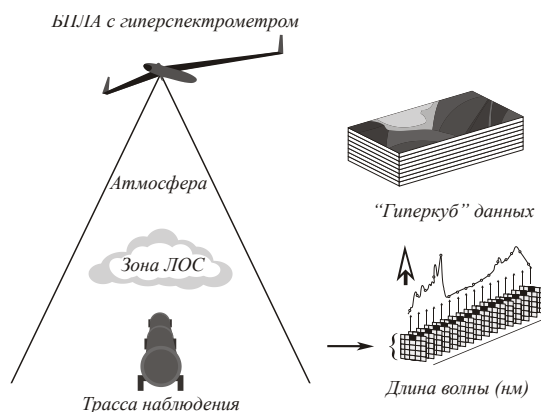


Рис. 1. Схема получения гиперспектральных данных

В данной работе предлагается метод и средство мониторинга газо- и нефтепроводов в оптическом диапазоне с борта ЛА, включая БПЛА. В качестве метода оценки состояния газо- и нефтепровода предлагается гиперспектральный анализ, а в качестве средства малогабаритный гиперспектрометр на базе схемы Оффнера.

На рисунке 2 приведена структурная схема малогабаритного гиперспектрометра для мониторинга нефте - газопроводов в спектральных диапазонах (1-2,5; 3-5; 8-11)мкм. Основные функциональные узлы – мультиспектральный объектив ($f=mm$; $2\omega=8,50$; 1:1,5); спектроанализатор по схеме Оффнера; блок фотоприемников

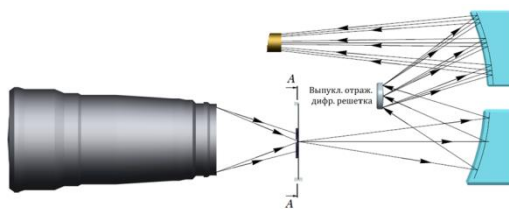


Рис. 2. Структурная схема гиперспектрометра

Расчет отношения сигнал/шум

Для оценки диапазонов оптических толщин среды, проведем расчет отношения сигнал/шум в получаемом спектре при регистрации гиперспектрального изображения для спектральных интервалов, соответствующих окнам прозрачности атмосферы. При этом будем считать, что светосила, размер входного окна, спектральное и пространственное разрешение у приборов, для различных спектральных интервалов, остается теми же самыми.

Рассмотрим спектральный диапазон от 8 до 11 мкм.

Максимальным исследуемым потоком, который может иметь место при исследовании подстилающей поверхности Земли, можно считать поток, испускаемый черным телом (с коэффициентом черноты равным единице), имеющим температуру около 320К. Интегральный поток черного тела с этой температурой, излучаемый в спектральном диапазоне 8-11 мкм составляет:

$$P_{8-11} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / \text{см}^2 \text{ср}$$

Телесный угол, в котором принимает излучение отдельный пиксел матрицы приемников, составляет:

$$\Omega = S_{зем} / h^2 \cong 2,21 \cdot 10^{-7} \text{ ср} ,$$

где $S_{зем}$ - пространство земли, размер которого охватывается одним пикселем приемника (47x47мм²), h - расстояние до прибора 100 м.

Если принять во внимание, что площадь входного окна прибора $S_{приб} = 12,57 \text{ см}^2$, общее пропускание схемы можно принять как $\tau = 0,7$, то интегральный поток на приемнике, получаемый от черного тела при $T = 320\text{К}$:

$$\begin{aligned} \Phi &= P_{8-11} \Omega S_{приб} \tau = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,21 \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 0,7 \\ &= 8,56 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \end{aligned}$$

Если принять, что энергия одного кванта для длины волны 10мкм составляет $E_{кв\ 10} = 2 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$, то число квантов, приходящихся на один пиксел приемника от интегрального потока в спектральном диапазоне:

$$N_{квант} = 4,28 \cdot 10^8 \text{ квант} / \text{секунда} .$$

Дифракционный прибор имеет пространственную кодировку длин волн. Приходящее на решетку интегральное излучение разделяется на число необходимых для регистрации спектральных диапазонов и каждое из этих разделенных частей излучения регистрируется отдельным пикселем (реально, чаще всего на один пиксел приходится только часть этого малого потока, так как один спектральный интервал необходимо регистрировать, по крайней мере, двумя пикселями). Следовательно, в лучшем случае, на один пиксел приходится (в этом интервале, в первом приближении, можно считать, что энергия распределена равномерно по всему спектральному диапазону) $N_{квант\ пик.} = N_{квант} / M$, где M - число спектральных интервалов. Если $M = 200$, то $N_{квант\ пик.} = 2,14 \cdot 10^6 \text{ квант в секунду}$. При выбранной системе регистрации и выбранных параметрах прибора, время усреднения составляет около 100мсек, эффективность преобразования 0,8.

Величина сигнала $S_{реш} = 1,71 \cdot 10^5$ электрон, величина шума $N_{шум} = 1000$ электрон.

Отношение сигнал/шум в спектре от максимального сигнала $\chi \cong 171$.

Рассмотрим **спектральный диапазон от 3 до 5 мкм** при тех же условиях:

$$B_{3-5} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} / \text{см}^2 \text{ср} ;$$

$$\begin{aligned} \Phi &= B_{3-5} \Omega S_{\text{приб}} \tau = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,21 \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 0,7 = \\ &= 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} ; \end{aligned}$$

$$E_{\text{кв } 4} = 5 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} ;$$

$$N_{\text{квант}} = 1,36 \cdot 10^7 \text{ квант} / \text{секунда}.$$

Гиперспектральный прибор имеет $S_{\text{реи}} = 6,8 \cdot 10^4$ электрон при шуме 1000 электрон.

Отношение сигнал/шум в спектре от максимального сигнала $\chi \cong 68$.

Последующие спектральные диапазоны рассчитываются, практически, тем же самым образом, но вместо собственного излучения черного тела при определенной температуре, берется интеграл отраженной солнечной энергии при максимальном альбедо равным 0,7.

Рассмотрим **спектральный диапазон 1-2,5 мкм**, при этом считаем, что для максимального сигнала альбедо $\alpha = 0,7$:

$$B_{1-2,5} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / \text{см}^2 \text{ср} ;$$

$$\begin{aligned} \Phi &= B_{1-2,5} \Omega S_{\text{приб}} \tau = 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2,21 \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 0,7 \cdot 0,7 = \\ &= 7,76 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} ; \end{aligned} \quad E_{\text{кв } 2} = 10^{-16} \text{ Дж} ;$$

$$N_{\text{квант}} = 7,76 \cdot 10^7 \text{ квант} / \text{секунда} ;$$

$$N_{\text{квант пик}} = 3,9 \cdot 10^5.$$

Считая эффективность преобразования равной 0,8, время накопления сигнала 100 мсек, шум приемника около 250 электронов, отношение сигнал/шум будет равно $\chi \cong 108,4$.

Расчет диапазона оптической толщины

При дистанционном мониторинге получаемый спектр зоны, содержащей летучие органические соединения (ЛОС), позволяет упростить алгоритм выделения эхо-сигнала, мощность которого определяется следующим выражением относительно одной длины волны излучения λ_i [9]:

$$P(\lambda_i) = \tilde{K}(\lambda_i) P_0(\lambda_i) \exp \left\{ -2 \sum_j^k \left(\int_0^L N_j(z) \sigma_j(\lambda_i, z) dz \right) - 2 \int_0^L \varepsilon(\lambda_i, z) dz \right\} \quad (1)$$

где P_0 - мощность излучателя; L - расстояние до зоны ЛОС; $\sigma(\lambda_i, z)$ - показатель рассеяния; $\varepsilon(\lambda_i, z)$ - показатель ослабления в атмосфере; $\tilde{K}(\lambda_i, z)$ - число учитываемых газовых компонент; $N(z)$ - концентрация вредных соединений. Данное соотношение может быть применено для определения пороговой характеристики по спектру, с учетом требуемой

величины сигнал/помеха для обнаружителя. Коэффициент пропускания зоны ЛОС будет $\tau_{\text{ЛОС}} = \exp(-D_{\text{ЛОС}})$ и для сцены $\tau_{\text{сц}} = \exp(-D_{\text{сц}})$, где D — оптическая толщина. Спектральное отображение зоны ЛОС при заданном волновом числе можно записать в виде следующего соотношения:

$$Y(\nu) = \Phi_0 e^{-D_{\text{сц}}} e^{-D_{\text{ЛОС}}} + P_1(1 - e^{-D_{\text{ЛОС}}})e^{-D_{\text{сц}}} + P_2(1 - e^{-D_{\text{сц}}}), \quad (2)$$

где: Φ_0 — спектр излучения компонентов земной поверхности; $P_1(\nu, T_1)$, $P_2(\nu, T_2)$ — функции Планка с температурами T_1 (зоны ЛОС) и T_2 (исследуемой сцены). При концентрации ЛОС, равной нулю ($D_1 = 0$), спектральную составляющую можно определить как:

$$Y_0(\nu) = \Phi_0 e^{-D_{\text{сц}}} + P_2(1 - e^{-D_{\text{сц}}}) \quad (3)$$

откуда Φ_0 можно представить как:

$$\Phi_0 = \frac{Y_0 - P_2(1 - e^{-D_{\text{сц}}})}{e^{-D_{\text{сц}}}} \quad (4)$$

На основе соотношений (4) и (2), коэффициент пропускания зоны ЛОС можно определить как:

$$\tau_{\text{ЛОС}}(\nu) = \exp(-D_{\text{ЛОС}}) = \frac{Y - P_2 + \Delta P e^{-D_{\text{сц}}}}{Y_0 - P_2 + \Delta P e^{-D_{\text{сц}}}} \quad (5)$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$.

Данное выражение определено для температур T_1, T_2 и высотой до зоны выброса ЛОС и его можно упростить, приняв $T_1 \approx T_2$ (что свойственно при дистанционном мониторинге в полевых условиях [10]):

$$\tau_{\text{ЛОС}}(\nu) = \exp(-D_{\text{ЛОС}}) = \frac{Y(\nu) - P(\nu, T)}{Y_0(\nu) - P(\nu, T)}. \quad (6)$$

Математическим условием для спектрального отображения зоны ЛОС является:

$$\Delta Y(\nu, T) = [B_0(\nu) - P(\nu, T)] \neq 0 \quad (7)$$

Обратите внимание, что при $\Delta Y(\nu, T) > 0$ фиксируется спектр поглощения, а при отрицательных значениях ΔY — эмиссионный спектр зоны ЛОС. При известном значении спектрального отображения, возможно определить минимальную концентрацию ЛОС, которую может идентифицировать прибор.

Примем, что при положительном значении спектрального отображения, отношение сигнал/помеха для коррелированного спектра $\Delta Y(\nu, T)$ равно $\chi(\nu) = \Delta Y(\nu) / \delta Y$, где δY — среднеквадратичное значение шума. Отсюда, соответствуя закону Бугера — Ламберта — Бера [11], минимальная концентрация, регистрируемая прибором:

$$\tau_{\min} = \exp(-D_{\min}) = \frac{\Upsilon_0(v) - \delta\Upsilon - P(v, T)}{\Upsilon_0(v) - P(v, T)} = \left(1 - \frac{1}{\chi}\right) \quad (8)$$

Из этого выражения мы можем определить минимальную оптическую толщину среды, распознаваемую гиперспектральным прибором:

$$D_{\min} = -\ln(1 - 1/\chi) \quad (9)$$

Таким же образом мы получаем следующие математические условия для определения максимальной распознаваемой оптической толщины зоны, содержащей ЛОС:

$$D_{\max} = \ln\left(\frac{\Upsilon_0(v) - [P(v, T) - \delta\Upsilon]}{\Upsilon_0(v) - P(v, T)}\right) = \ln(\chi). \quad (10)$$

Для вычисления относительной погрешности измерения прибора, примем что $\delta\Upsilon_0 = \delta\Upsilon = \text{const}$ (что обусловлено высокими значениями шума ФПУ в инфракрасном диапазоне спектра [12]). Таким образом, значение относительной погрешности определения оптической толщины может быть найдено из соотношения (11):

$$\theta = \frac{\delta D}{D} = \frac{1}{D} \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial \Upsilon} \delta\Upsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \Upsilon_0} \delta\Upsilon_0\right)^2} = \frac{1}{\chi D} \sqrt{1 + e^{2D}}.$$

Проведем расчет минимальных и максимальных значений, определяемых прибором, оптических толщин и относительных ошибок измерения на основании рассчитанных величин отношений сигнал/шум и формул (9),(10),(11) для трех спектральных диапазонов, соответствующих окнам прозрачности атмосферы. Результаты расчета показаны в таблице.

Табл. 1. Результаты расчета оптических толщин и относительных ошибок для разных спектральных диапазонов

Рассчитываемые параметры	Спектральные диапазоны, мкм		
	8-11	3-5	1-2,5
χ - отн. сигнал/шум	171	68	108
D_{\min} - минимальная оптическая толщина	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$
D_{\max} - максимальная оптическая толщина	5,14	4,22	4,69
θ_{\min} - отн. погрешность для мин опт. толщины, %	140	142	146
θ_{\max} - отн. погрешность для max опт. толщины, %	19,4	23,7	21,4

Был изготовлен по заказу экспериментальный образец (приведен на фотографии), предназначенный для мониторинга нефте-газопровода с борта ЛА (вертолет). Проведенные предварительные экспериментальные исследования в лабораторных условиях подтвердили правильность выбранных решений (но безусловно экспериментальные исследования будут проведены в дальнейшем)

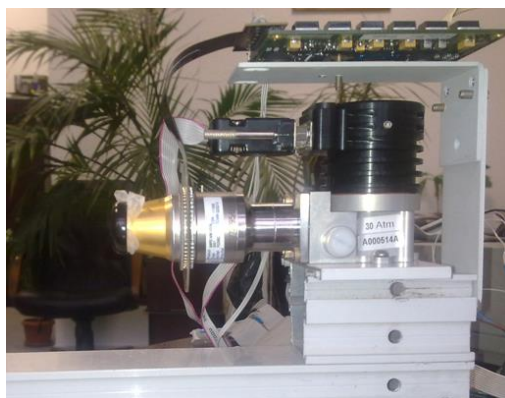


Рис. 3. Фотография гиперспектретра на стенде

Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований был разработан эскизный проект гиперспектретра для оценки состояния нефте- газопроводов с борта вертолета. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности создания опытного образца и проведение полномасштабных натурных исследований.

Литература

1. Палатов Ю.А., Князев Н.А., и др. Мониторинг аварийных ситуаций, пожаров и промышленных выбросов при помощи космических средств наблюдений. //, 19-21 июня 2006, ГНТЦ РФ «НИФХИ», МНТЦ:-М.: 2006
2. Новгородская А.В. Обзор методов бесконтактного дистанционного обнаружения и идентификации опасных веществ. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 8.
3. В. Воронов. Комплексная система мониторинга объектов ОАО «Газпром» с помощью БЛА. ФНПЦ «НефтеГазАэроКосмос». [Электронный ресурс]. – URL: <http://uav.ru/articles/KSKM.pdf> (дата обращения 18.03.2016).
4. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. М.: Газойл пресс, 2003. 352 с.
5. Головин, А.Д. Имитационная модель многоканального гиперспектретра Оффнера / А.Д. Головин, А.В. Дёмин // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 521-528. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.
6. Казанский, Н.Л. Моделирование работы космического гиперспектретра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76.
7. Головин А.Д. Малогабаритный гиперспектретр видимого и ближнего инфракрасного диапазонов / А.Д. Головин, А.В. Дёмин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. Т. 58, № 11. – С. 869-875.
8. Лялько В.И., Федоровский О.Д., Попов М.О. и др. Многоспектральные методы дистанционного зондирования Земли в задачах природопользования. Киев: Наукова думка, 2006. 357 с.
9. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов и др. Под ред. В.Н. Рождествина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 528 с.: ил. (Сер. Электроника)
10. Welton E.J., Campbell J.R., Berkoff T.A et al. The Micropulse Lidar Network (MPL-Net) – Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences: Reviewed and revised papers at the twenty-first Int. Laser Radar Conference (ILRC21). Part I. Quebec. Canada. 8–12 July 2002.
11. Основы фурье-спектрометриии / А.Н. Морозов, С.И. Светличный; под ред. Г. К. Васильев. Ин-т энергет. проблем хим. физики РАН. - М. : Наука, 2006. - 275 с.
12. Zarco-Tejada, P.J.; Gonzalez-Dugo, V.; Berni, J.A.J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress using a micro-hyperspectral images and a thermal camera. Remote Sens. Environ., 117, 322–337 (2012).